

Usinage des composites renforcés en fibres de carbone : stratégie de surfacage pour limiter les efforts de coupe.

Carbon fibers composites machining: surfacing strategy for reducing cutting forces

**Antoine Morandeau¹, Rene Leroy¹, Abdelhake Bouchou¹
et David Bonhoure²**

1 : CEROC-LMR Université François Rabelais Tours.

2 : SAFETY SAS 37230 Fondettes.

e-mail : antoine.morandeau@safety-cuttingtools.com, rene.leroy@univ-tours.fr, abdelhake.bouchou@univ-tours.fr

Résumé

Les matériaux composites sont des multi-matériaux (matrice + renfort) souvent anisotropes. De part leur constitution, ces matériaux posent de nombreuses problématiques lors de leur usinage. Les défauts générés lors de l'opération de parachèvement de la pièce peuvent être : la décohésion de deux plis de matière, l'écaillage des fibres, ou la dégradation thermique de la résine polymère. De plus le caractère abrasif des fibres de carbone tend à user rapidement les arêtes de coupe, augmentant ainsi la génération des défauts cités précédemment. Dans cet article, nous proposons une stratégie d'usinage en surfacage limitant les efforts sur l'arête. Le matériau utilisé est un composite Carbone/résine époxy (T800S/M21), il a été observé que la résultante des efforts s'appliquant sur l'outil est maximum lorsque l'angle entre la vitesse de coupe et la fibre est entre 0° et 45°. Connaissant les orientations des plis dans la matière, il est alors possible de jouer sur l'engagement de la fraise et la profondeur de passe pour limiter les efforts de coupe sur l'outil.

Abstract

Aeronautic composites are most often consisted of two distinct phases. The anisotropic structure causes severe challenges when machining. Some defects can be observed during machining: delamination consisting of two plies disbonded, fibers flaking and thermal defects such like resin burned. Moreover, the high abrasive properties of the carbon fibers causes severe degradations of the cutting edge, and a worn edge tends to increase the machining defects. In this paper, we described a cutting strategy which contributes to decrease the value of the cutting force. Composite material used is a carbon/epoxy (T800S/M21). This analysis of the cutting forces in surfacing condition prove that the higher force value is reached for an angle between the cutting force and the fiber orientation include in 0° and 45°. Knowing the fiber orientation of each plies in the material, a strategy can be apply with the parameters depth of cut and the milling engagement as variables to decrease the cutting force value.

Mots Clés : usinage, composite, efforts de coupe.

Keywords : machining, composite, cutting forces.

1. Introduction

Les matériaux composites utilisés dans l'aéronautique sont constitués le plus souvent de deux phases distinctes : d'un côté, les fibres de renforcement qui sont très résistantes et orthotropiques, d'un autre côté la matrice qui est isotropique. Ces deux phases ont des comportements mécaniques et thermiques différents. Au niveau structurel, les matériaux composites sont construits le plus souvent en empilement de plusieurs couches appelées plis. Ces plis rendent la structure anisotrope et soulèvent de nombreuses problématiques lors de leur usinage: 1. L'intégrité de la pièce composite 2. L'usure de l'outil coupant.

L'industrie aéronautique exige de garder un niveau de qualité élevé lors du parachèvement des pièces souvent vitales dans un avion. Parmi les défauts à éviter : le délaminage qui est une décohésion entre deux plis, les défauts thermiques qui peuvent apparaître avec une mauvaise condition de coupe ou un outil trop usé. La résine carbonise et les liens entre résine et les fibres se retrouvent ainsi affaiblis. D'autres défauts d'usinage peuvent être décelés comme l'écaillage des plis ou des plis non coupés francs. Toutes ces non-qualités ne sont pas acceptables et nous conduisent

à s'intéresser aux phénomènes mis en jeu lors d'un usinage. Le relevé d'effort de coupe constitue une base de départ.

Le comportement de l'usinage des composites à fibres de carbone a été étudié par Koplev et al. [1], et Ramulu et al, [2], dans ces études, des relevés d'efforts ont été effectués en coupe orthogonale. J.Y.Sheikh Ahmad [5] quant à lui récence, dans son ouvrage, des relevés d'efforts en contournage. Tous ces auteurs concluent que l'orientation des fibres est un facteur très influent dans l'endommagement à la fois de l'outil et de la matière. Nos travaux tendent à élargir l'étude des efforts de coupe en condition de surfacage avec des outils dédiés à une avance rapide.

2. Matériels et expérimentation :

Les essais ont été réalisés sur un centre d'usinage PCI Météor 10 ($N_{max}=24000\text{tr/min}$, $P=40\text{kW}$), ce dernier était équipé d'une table d'acquisition d'efforts Kistler (Type 9255B). Le dispositif est illustré par la figure 1. Le matériau usiné est un composite multiaxial, carbone/époxy (T800S/M21) sous forme d'éprouvette de $180\text{mm} \times 180\text{mm} \times 17\text{mm}$. L'empilement des plis dans le composite est le suivant : $[45/90/135/0]_s$. L'épaisseur d'un pli est $0,26\text{mm}$.

Un usinage préparatoire a été effectué pour se positionner sur l'interface entre 2 plis. Pour chaque essai les conditions de coupe étaient identiques, elles sont indiquées dans le tableau 1:

| | |
|---------------|-------|
| Vc(m/min) | 100 |
| Fz(mm/tr/dts) | 0,3 |
| Ap(mm) | 0,26 |
| Ae(mm) | 35,6 |
| Diamètre(mm) | 35,6 |
| Lubrification | à sec |

Tab1 .conditions de coupe

La fraise était équipée d'une plaquette en carbure de tungstène (6% Cobalt) de référence PDKT 0905FR11 du fabricant d'outil coupant Safety. Notre choix s'est porté sur une géométrie avec une acuité d'arête élevée (le rayon d'arête est inférieur à $10\mu\text{m}$) recommandée par [3-5]. La géométrie dite de « grande avance », nous permettra de mieux observer l'influence de chaque pli en termes d'usure abrasive sur l'arête.

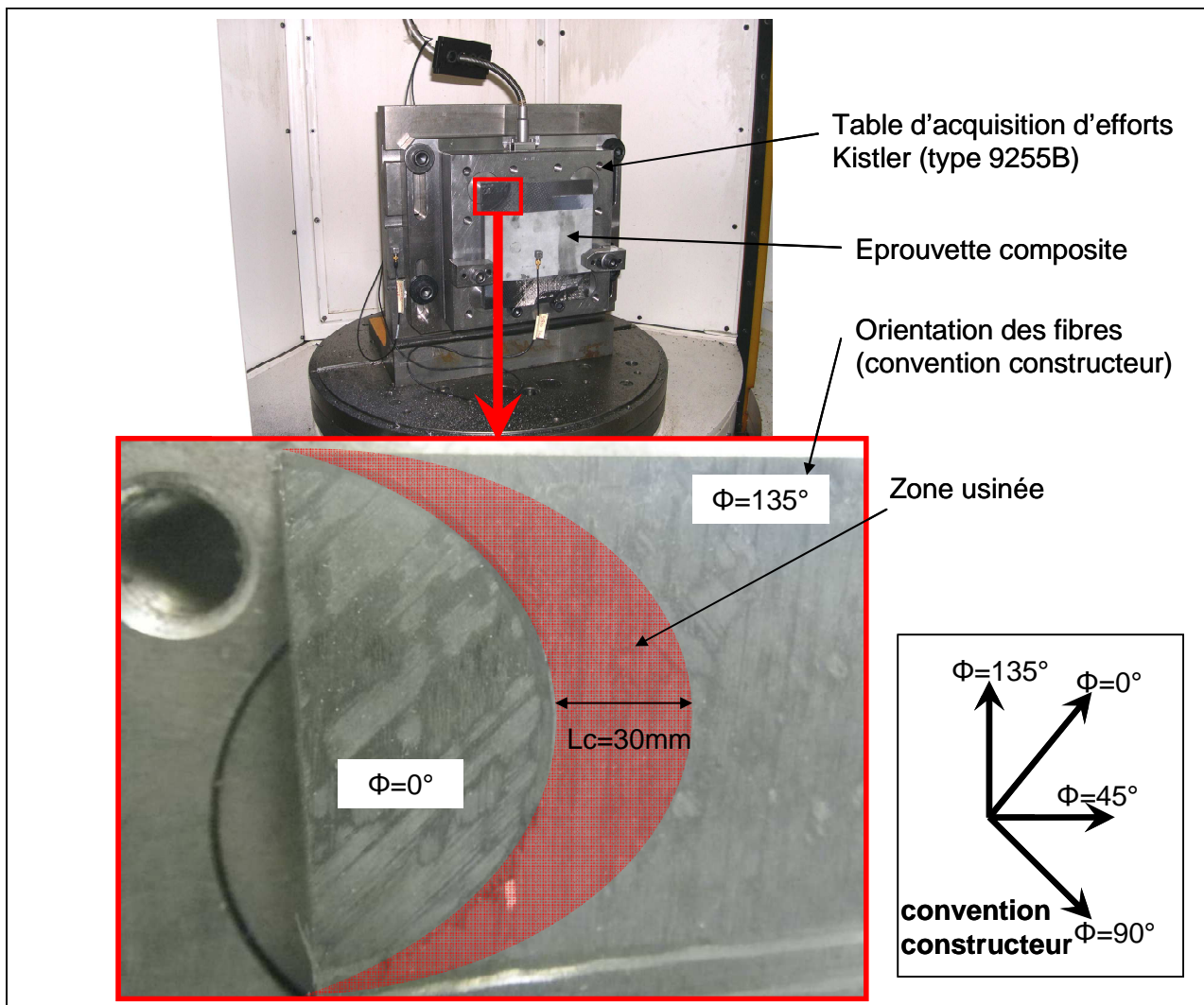


Fig1. Illustration du dispositif et de la stratégie de surfacage.

L'usinage effectué sur la pièce est un surfacage avec un engagement de la fraise de 100% du diamètre, la longueur d'usinage est de 30mm. Sur la figure 1, la zone usinée est représentée en rouge, un pré-usinage a été réalisé pour s'affranchir des 18 premiers millimètres de coupe qui correspondent à l'entrée progressive de la fraise dans la matière.

2.1 Paramétrage des angles

Angles fixes :

Concernant les angles d'orientation des fibres, nous prenons comme référence les orientations données par le plan de drapage du constructeur. Sur la figure 1, deux plis sont indiqués et visibles, celui à 135° et 0° selon la convention constructeur. Ils sont mesurés dans un repère fixe lié à la pièce et cet angle est noté Φ . Les différents angles pris en compte pour le paramétrage de l'outil sont définis dans le Tableau 2 :

| | |
|-----------------------|------------|
| Angle d'attaque Kr | 19° |
| Angle de coupe radial | -8° |
| Angle de coupe axial | 10° |

Tab2 .Angles de paramétrage de l'outil

Angles variables θ et Ω :

L'angle formé entre la vitesse de coupe et la direction de la fibre est noté θ , cette convention a été choisie pour repérer les modes de coupe introduit par Ramulu [2]. La figure2 est issu de ses travaux, elle montre les différents modes de coupe que peut rencontrer l'arête de coupe lors de l'usinage.

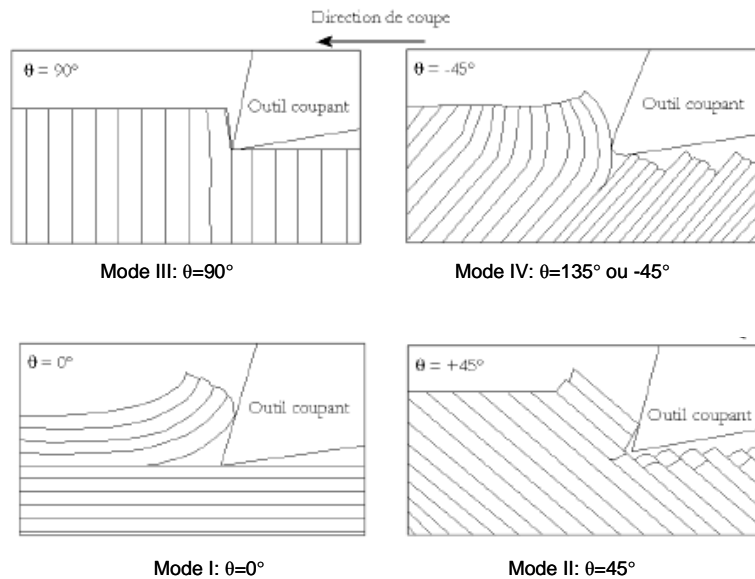


Fig2 .Mode de coupe selon .Ramulu[2].

L'angle d'engagement de la fraise est noté Ω , il est mesuré entre le repère fixe et le repère tournant. Cet angle varie de 0° à 360° , et comme 100% du diamètre de la fraise est engagé, le domaine de variation qui nous intéresse est situé entre 180° et 270° , ce qui correspond à la formation du copeau.

2.2 Paramétrage de la fraise

Afin de récupérer les efforts appliqués sur la plaquette nous avons fait un paramétrage de la fraise : les données d'efforts issues de la table Kistler sont dans un repère fixe lié à la table d'acquisition qui pour notre cas est le repère F_{xf}, F_{yf}, F_{zf} . Un repère tournant a été mis en place F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} avec comme paramètre l'angle Ω qui est la position angulaire de la fraise à l'instant t . Sur la figure 3 et 4 le repère F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} et F_{xf}, F_{yf}, F_{zf} sont représentés. Finalement un repère fixé à la plaquette $F_{4cx}, F_{4cy}, F_{4cz}$ prend en compte la plaquette dans son logement : angle de coupe radial et angle de coupe axial ainsi que l'angle d'attaque.

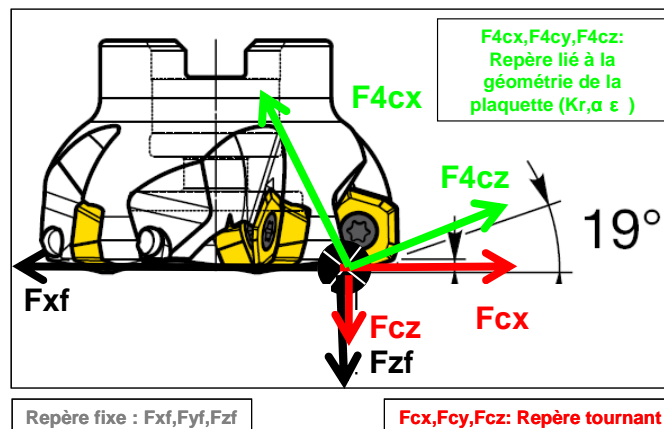


Fig3 .Vue de côté de la fraise avec une représentation des différents repères.

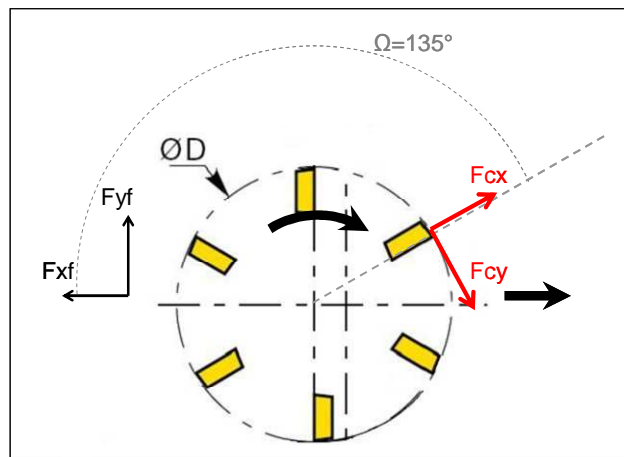


Fig4 .Vue de dessus de la fraise représentée pour un angle de rotation de la fraise de 135° avec le repère tournant lié à la plaquette F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} .

Ce paramétrage nous permet de récupérer à l'instant t l'effort appliqué sur la plaquette.

3. Résultats et Discussion

Le schéma de la figure 5 représente la chaîne d'acquisition des efforts ainsi que le post-traitement des données. En effet, les efforts de coupe relevés sur les composites sont très bruités, un filtrage des données avec un filtre passe-bas doit être mis en place pour récupérer la composante statique des signaux.

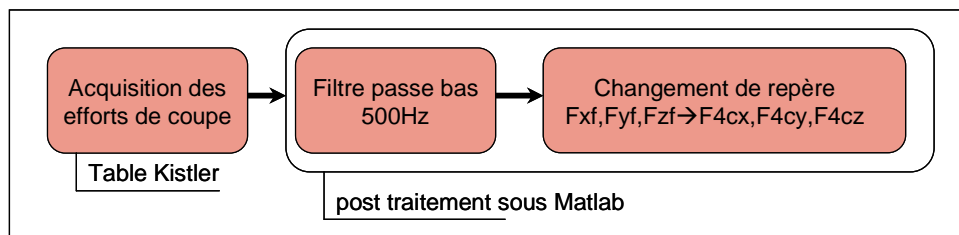
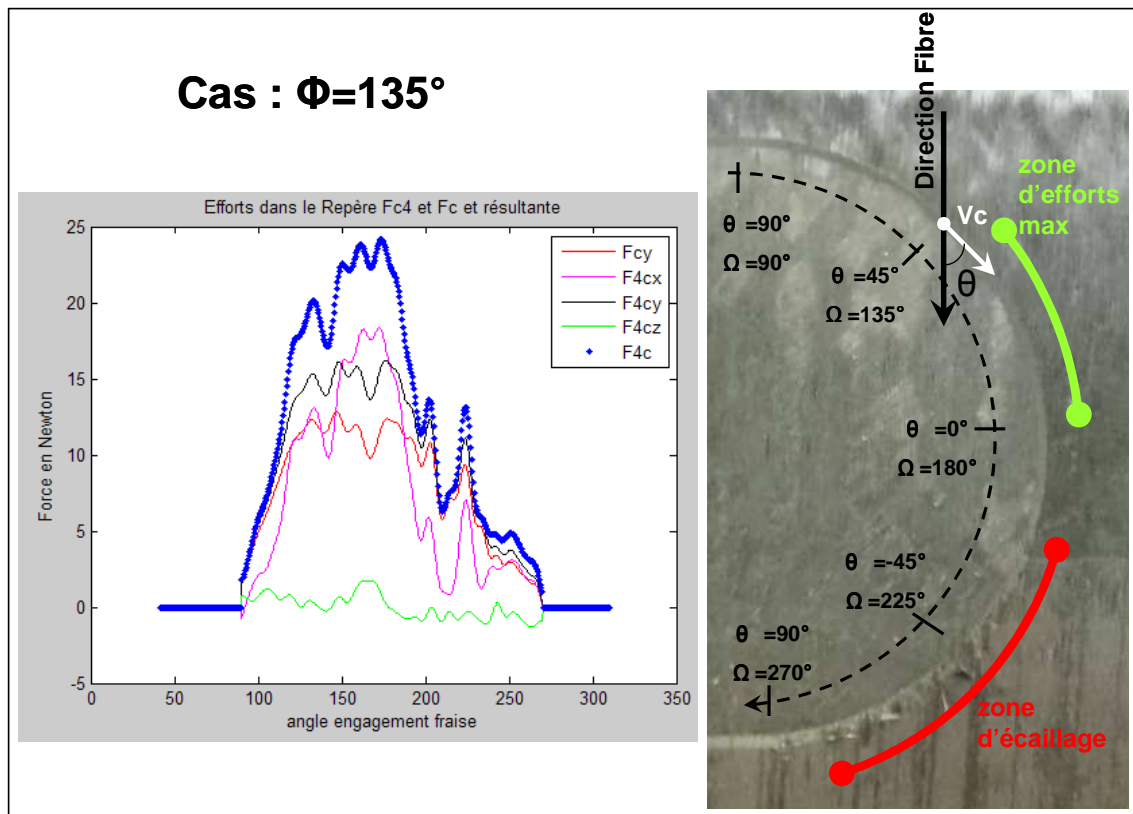
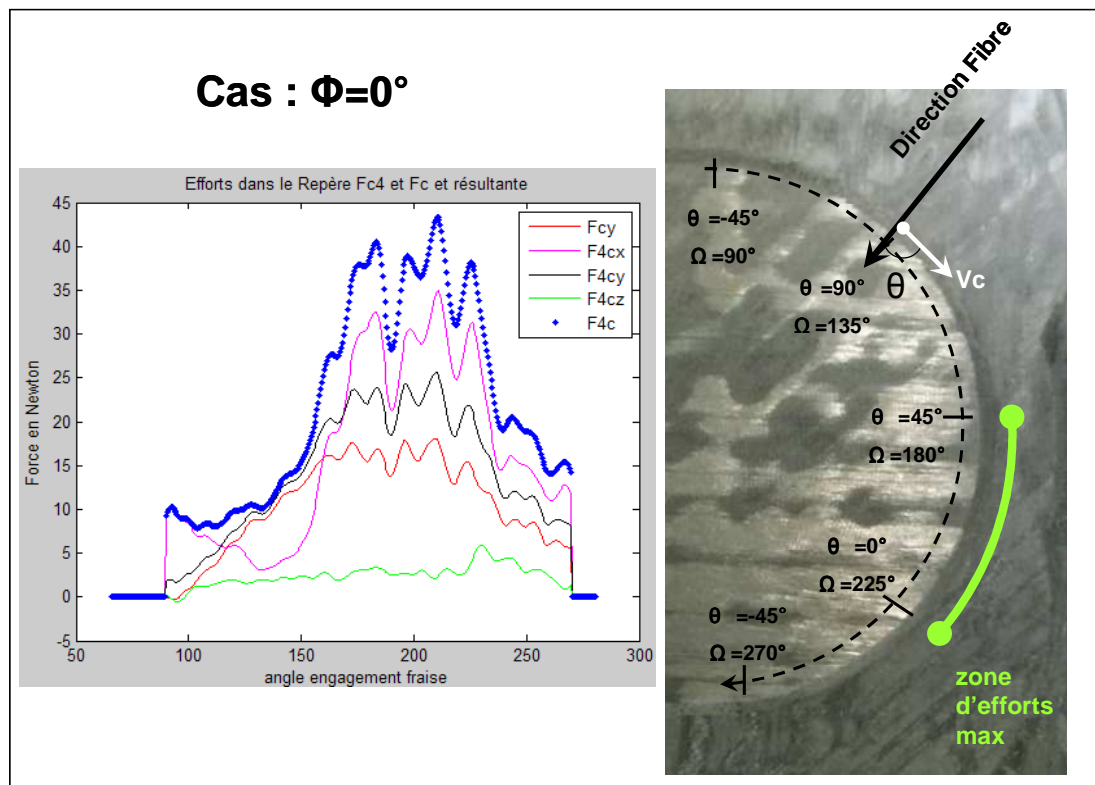


Fig5 .Schéma du procédé d'analyse

Les figures 6, 7, 8 et 9 représentent l'évolution des efforts de coupe pour les plis respectifs $135^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ et 90° . Pour chaque relevé d'efforts une photo de la surface usinée a été prise, elle permet de déceler d'éventuels défauts d'aspect visuels, du type plis non coupés francs ou écaillage des fibres.

Fig6 .Efforts de coupe et photo pour l'usinage du pli à 135°

L'usinage du pli à $\Phi=135^\circ$: on remarque une résultante des efforts maximum $F4c$ (zone verte) pour un mode de coupe entre II et I correspondant à $\theta=45^\circ$ et $\theta=0^\circ$. On observe également la génération d'écaillage en surface (zone rouge), avec un effort minimum.

Fig7 .Efforts de coupe et photo pour l'usinage du pli à 0°

L'usinage du pli à $\Phi=0^\circ$: le pic d'effort est enregistré également pour le mode de coupe entre I et II, aucun écaillage n'a été détecté visuellement sur cette configuration.

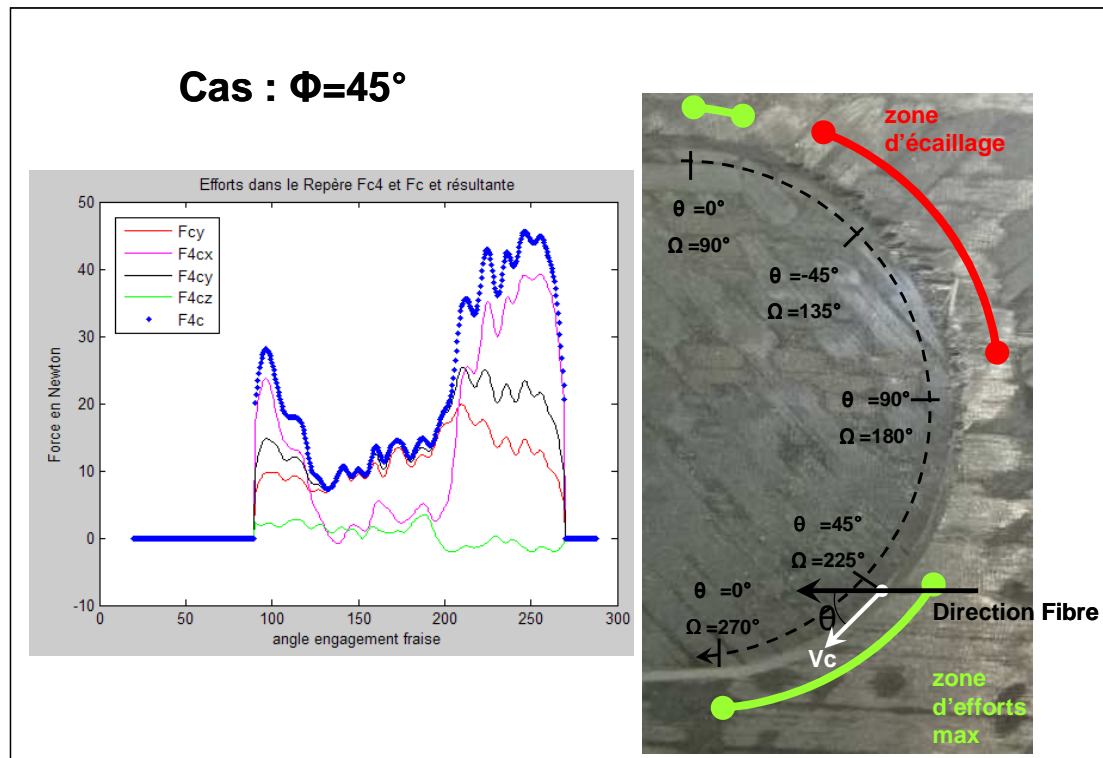


Fig8. Efforts de coupe et photo pour l'usinage du pli à 45°

L'usinage du pli à $\Phi=45^\circ$: on remarque des maxima locaux pour l'entrée et la sortie de la fraise dans la matière, ils correspondent à l'usinage en mode I qui génère un effort de coupe moyen. Le maximum d'effort se situe lors de l'usinage avec $\theta=45^\circ$. Les défauts d'écaillage se situent en première moitié du copeau, on peut aussi remarquer un écaillage plus important sur cette configuration comparé à l'usinage du pli à 135° .

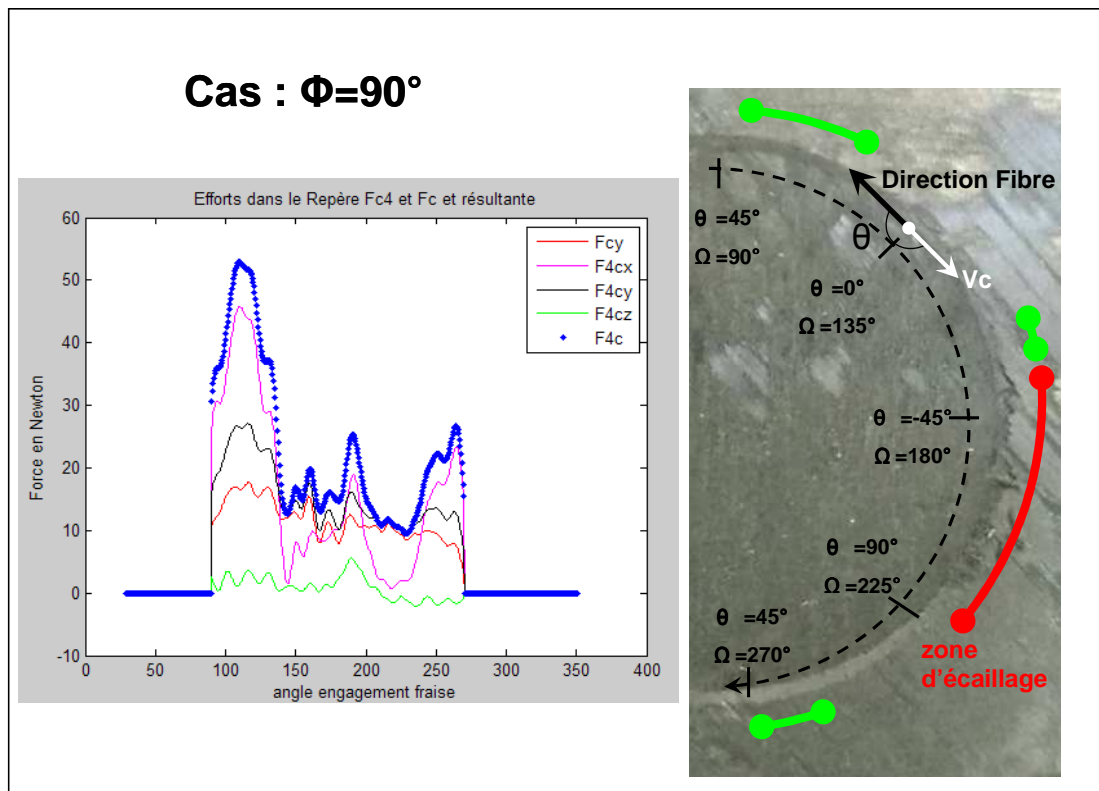


Fig9 .Efforts de coupe et photo pour l'usinage du pli à 90°

L'usinage du pli à $\Phi=90^\circ$: Les maxima d'efforts sont observés pour $\theta=45^\circ$ qui se situe dans l'usinage en entrée et en sortie d'usinage c'est-à-dire au copeau minimum. L'écaillage est prononcé lorsque $\theta=135^\circ$ c'est-à-dire lors du copeau maximum.

D'après les travaux réalisés par [5-8], en usinage de profilage, la composante tangentielle de l'effort de coupe est maximum lorsque θ est entre 90° et -45° (mode III et IV). Les auteurs concluent par ailleurs qu'un effort maximum sur cette plage peut contribuer à endommager la matière sous la surface usinée. Le choix dans la géométrie de coupe dite « grande avance » avec $K_r=19^\circ$ est alors justifié par le fait que les efforts de coupe ne se trouvent pas à maximum sur les modes III et IV mais au contraire à un minimum. Ceci peut s'expliquer par une répartition différente des efforts du fait des angles d'attaque différents entre notre étude et [5-8].

4. Conclusions et perspectives:

Dans cette étude, des relevés de l'effort de coupe ont été effectués lors du surfacage d'un composite carbone/époxy multiaxial. L'analyse des efforts de coupe nous permet de statuer sur les configurations engendrant le plus d'efforts sur l'arête. Les efforts maximum ont été enregistrés pour le mode de coupe entre 45° et 0° . Pour observer le « pouvoir abrasif des plis » nous avons effectué des usinages à vitesse de coupe élevées ($V_c=1000\text{m/min}$) pour accélérer les phénomènes d'usure et avec une profondeur de passe égale à 1,04 afin d'usiner les 4 plis en une seule passe.

Sur la figure 10, les zones d'usures sur l'arête de coupe sont clairement définies et correspondent au mode de coupe II et I. En comparant les travaux de [6-8], J.Y. Sheikh Ahmad déduit que pour un mode de coupe compris entre $\theta=0^\circ$ à 75° la composante des efforts axiaux est supérieure à la composante de coupe. Il explique ce phénomène par le retour élastique des fibres qui se redressent sous le passage de l'arête de coupe, ce qui induit une source potentielle d'usure en dépouille.

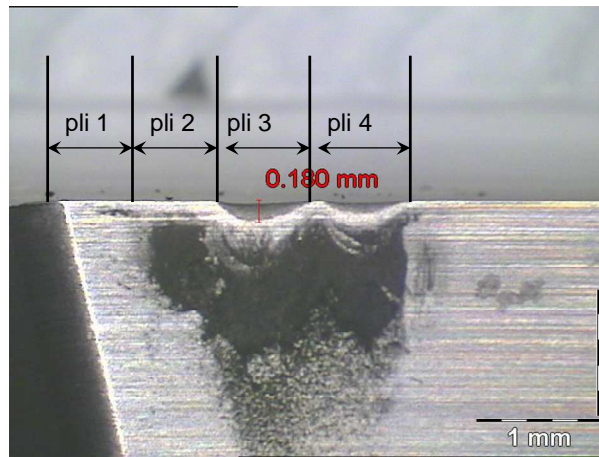


Fig10 .Vue de l'usure en dépouille de la plaquette PDKT 0905DEF11

Nos travaux tendent à vérifier ces conclusions tout en l'appliquant à un cas d'usinage de surfaçage. Ce que nous pouvons conclure :

1. La géométrie à grande avance diminue sensiblement les efforts pour l'usinage des modes III et IV.

2. En identifiant les modes de coupe « les plus abrasifs », une stratégie d'usinage est alors envisageable lors d'un surfaçage, elle consiste à éviter les configurations $\Phi=135^\circ$ et $\Phi=0^\circ$, lors desquels l'arête est plus souvent en contact avec le mode I et II. Ce qui engendre des efforts axiaux maximums et par suite des usures en dépouille sévères. Il est donc nécessaire de privilégier les configurations $\Phi=45^\circ$ et 90° , pour limiter les efforts axiaux.

A partir du moment où l'empilement dans le stratifié est connu, il est alors possible d'adopter une stratégie d'usinage adéquate. Pour notre cas l'empilement dans le stratifié est dans l'ordre du pli supérieur au pli inférieur : $[45_{16}/90_{16}/135_{16}/0_{16}]_s$. La figure 11, montre un exemple de différentes options d'usinage pour un engagement de la fraise de 50% du diamètre et l'épaisseur de deux plis en profondeur de passe.

Les perspectives de ces travaux sont les suivantes :

1. Quantifier le réel gain en durée de vie outil si une stratégie pour limiter les efforts axiaux est adoptée.
2. Quantifier les gains pour limiter l'échauffement de la résine et diminuer la rugosité de surface.

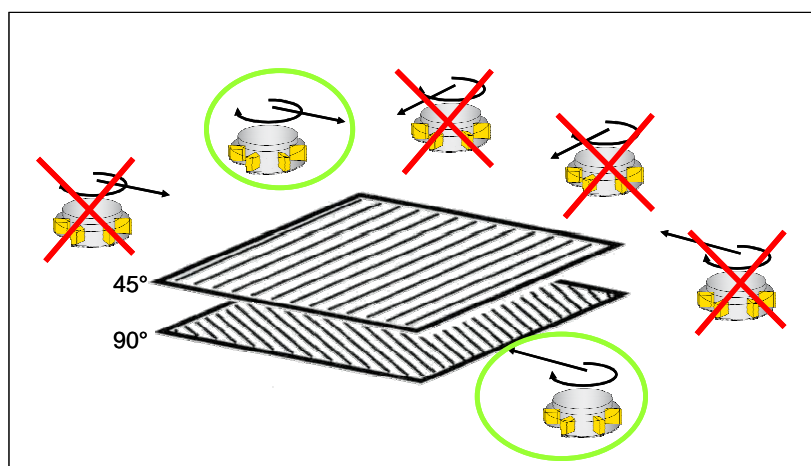


Fig11 .Stratégie de coupe à adopter pour limiter les efforts de coupe.

Références

- [1] A.KOPLEV, A. LYSTRUP, « The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP». composites 14, 371-376, 1983.
- [2] RAMULU, M. « Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites ». Sadhana, 22(3), 449-472. 1997.
- [3] P.GHIDOSI. «Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en matrices polymère sur leur réponse mécanique» thèse ENSAM, 2003.
- [4] D.ILLIESCU «Approches expérimentales et numérique de l'usinage à sec des composites» thèse ENSAM, 2008.
- [5] JAMAL Y.SHEIKH-AHMAD. «Machining of polymer composites» (Ed. Springer.) 2009.
- [6] WANG, D. H. «Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. part II: multi-directional laminate». International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35(12), 1639-1648. 1995.
- [7] WANG, X. «An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics». International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(10), 1015-1022. 2003.
- [8] BHATNAGAR, N. «On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates». International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35(5), 701-716. 1995.